

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Wieghardt K.** Erhöhung des turbulenten Reibungswiderstandes durch Oberflächenstörungen. *Forscheft, Schiffstech*, 1953, N 2, S. 65—81.
2. **Townes H. W., Sabersky R. H.** Experiments on the Flow over a rough Surface.—*«Int. J. Heat Mass Transfer»*, 1966, vol. 9, N 8, p. 729—738.
3. **Pan F., Acrivos A.** Steady Flos in rectangular cavities.—*«J. of Fluid Mech.»*, 1967, vol. 28, pt. 4, p. 643—655.
4. **Божков В. М.** Экспериментальное изучение рециркуляционных течений в прямоугольных канавках.—*«Учен. зап. ЦАГИ»*, т. IV, № 1, с. 1073.
5. **Fox J.** Heat Transfer and Air Flow in Trasverse rectangular Notch.—*«Int. J. Heat Mass Transfer»*, 1965, vol. 8, p. 269—270.
6. **Fox J.** A Criterion for the Transition between Flow Regimes in Turbulent Cavity Flow.—*«AIAA J.»*, 1966, vol. 4, N 2.
7. **Roshko A.** Some measurements of Flow in a rectangular cut out. NACA TN 3488, 1956.
8. **Tani I., Iuchi M., Komoda H.** Experimental Investigation of Flow Separation associated with a Step or a Groove Aeronautical Research Institute. University of Tokyo, Rept. N 364, 1961.
9. **Mills R. D.** On the closed Motion of Fluid in a square Cavity.—*«J. of the Royal Aero. Soc.»*, 1965, vol. 69, N 650, p. 116—118.
10. **Василенко Ю. Г., Дубнищев Ю. П., Коронкевич В. Н.** и др. Лазерный доплеровский измеритель скорости с параллельной фильтрацией.— В кн.: Когерентно-оптические доплеровские устройства в гидродинамическом эксперименте. Новосибирск, изд. ИАЭ СО АН СССР, 1974.
11. **Гиневский А. С.** Теория турбулентных струй и следов. М., «Машиностроение», 1969.
12. **Волячков Э. П., Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И.** Взаимодействие затопленной турбулентной струи с твердой стенкой.— ИМТФ, № 2, 1965.
13. **Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И.** Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М., «Энергия», 1972.
14. **Лойцянский Л. Г.** Механика жидкости и газа. М., «Наука», 1970.
15. **Гиневский А. С.** Расчет переходного участка турбулентной струи.—*«Изв. АН СССР. МЖГ»*, № 3, 1966.
16. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя. М., «Наука», 1969.
17. **Богатырев В. Я., Дубнищев Ю. И., Мухин В. А.** и др. Исследование течения в траншее прямоугольного сечения лазерным доплеровским измерителем скорости.— В кн.: Когерентно-оптические доплеровские устройства в гидродинамическом эксперименте. Новосибирск, изд. ИАЭ СО АН СССР, 1974.
18. **Василенко Ю. Г., Дубнищев Ю. П., Коронкевич В. П., Соболев В. С., Столповский А. А., Уткин Е. И.** Лазерные доплеровские измерители скорости. Новосибирск, «Наука», 1975.

УДК 533. 697. 4

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
НЕРАВНОВЕСНЫХ ТЕЧЕНИЙ СМЕСЕЙ  
ЧАСТИЦ ЛЕГКОПЛАВКОГО МЕТАЛЛА  
И ГАЗОВ В СОПЛЕ ЛАВАЛЯ**

*И. И. Иванов, Р. А. Иванова*

(Москва)

Имеется ряд работ [1—11] по определению параметров частиц конденсированной окиси, образующейся при горении металлизированных топлив. Неоднозначность, а иногда и противоречивость полученных опытных результатов [3—5, 9—11] свидетельствуют о трудности проведения корректных эксперимен-

тальных исследований. В связи с этим практический интерес представляют численные исследования с использованием смесей калиброванных жидких частиц металла и различных газов. С помощью «калиброванных» двухфазных течений можно проводить тарировку различных зондов, изучать обтекание моделей и зондов двухфазным потоком, взаимодействие жидких металлических частиц с фронтом аэродинамического скачка уплотнения, внедрение их в различные улавливающие среды, взаимодействие мелких частиц (частиц-снарядов) с частицами больших размеров (частицами-мишенями) и т. д. Во многих случаях для исследования вышеперечисленных явлений необходимо знать предысторию течения и параметры смеси газа с частицами в районе выходного сечения сопла.

В данной работе проведено численное исследование параметров различных неравновесных течений смесей частиц галлия и газов в сопле Лавала; определен максимальный диаметр (верхняя граница спектра) частиц ( $d_s = 30$  мкм), разрушающихся в сопле при воздействии аэродинамических сил и пригодных для использования в «калиброванном» двухфазном потоке. Расчеты проводились в одномерном приближении, согласно [12—14].

Металлом, из которого можно получить калиброванные жидкие частицы, является галлий (Ga).

В табл. 1 ( $\gamma_s$  — удельный вес частиц,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $c_v$  — теплоемкость,  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $\eta$  — коэффициент вязкости) приведены некоторые теплофизические свойства галлия [15]. Кроме галлия, для экспериментальных исследований представляют большой интерес и его эвтектические сплавы (табл. 2), плавящиеся при низкой температуре ( $T_{\text{плав}} = 276—290$  К).

Численное исследование неравновесных одномерных течений смесей частиц галлия с инертными газами — He, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, а также с воздухом с учетом коагуляции и аэродинамического дробления были проведены для сопла Лавала следующей геометрии (фиг. 1): диаметр минимального сечения сопла  $d_* = 20$  мм; относительные радиусы скругления горловины сопла в сужающейся и расширяющейся частях сопла  $\bar{R}_1 = R_1/d_* = 1$  и  $\bar{R}_2 = R_2/d_* = 1$  соответственно; полуугол на входе в сужающуюся коническую часть сопла  $\theta_1 = 15^\circ$ ; полуугол на входе в расширяющуюся коническую часть сопла, а также на выходе из сопла  $\theta_2 = \theta_3 = 2^\circ$ ; геометрическая степень расширения сопла  $f_c = F_a/F_* = 3,76$ .

Во всех расчетах давление газа в камере принималось равным  $p_0 = 10$  бар = const, температура  $T_0 = 600$  К (в некоторых случаях параметры газа брались при  $T_0 = 573$  К).

Предварительные расчеты, в которых критическое число Вебера  $W_*$  принималось равным  $W_* = 17—22$  [2], показали, что при прохождении минимального сечения сопла жидкие полидисперсные частицы галлия, диаметр которых  $d_s \geq 35$  мкм, дробятся. По этой причине за исходный был принят спектр, не деформирующийся при разгоне двухфазного потока в сопле, в

Таблица 1

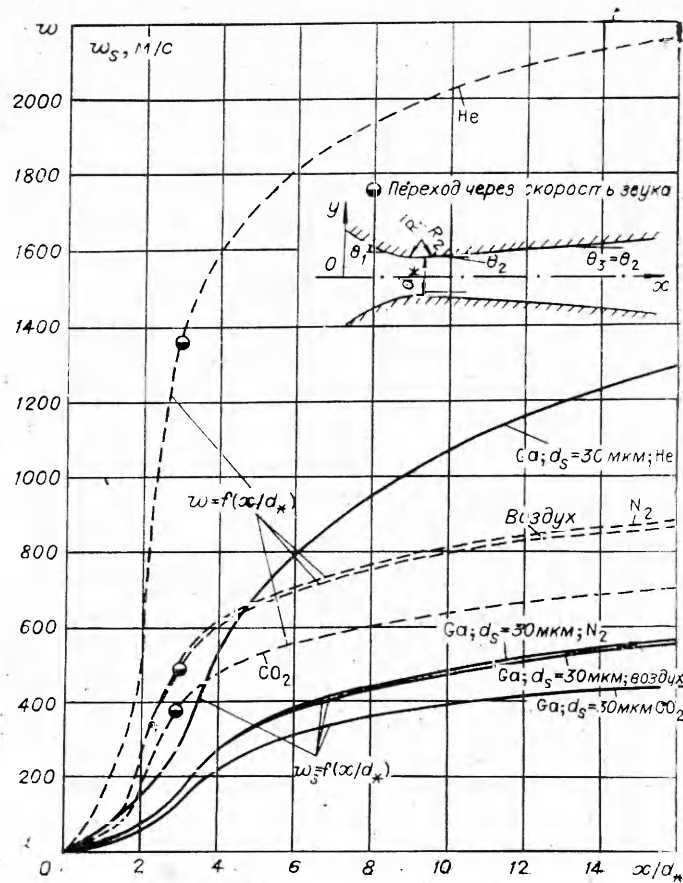
Теплофизические свойства галлия		Ga
$T_{\text{плав}}$ , К		302,8
$T_{\text{кип}}$ , К		$2503 \pm 283$
$\gamma_s \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	тврд.	5,904 (при $T=293$ К)
	жидк.	6,095 (при $T=302,8$ К)
$\sigma$ , н/м		0,698 (при $T=573$ К)
$\eta \cdot 10^2$ , пс/м <sup>2</sup>		1,097 (при $T=573$ К)
$\lambda$ , Вт/(м·град)		27 (при $T=373$ К)
$c_v$ , Дж/(кг·град)		345 (при $T=573$ К)

Таблица 2

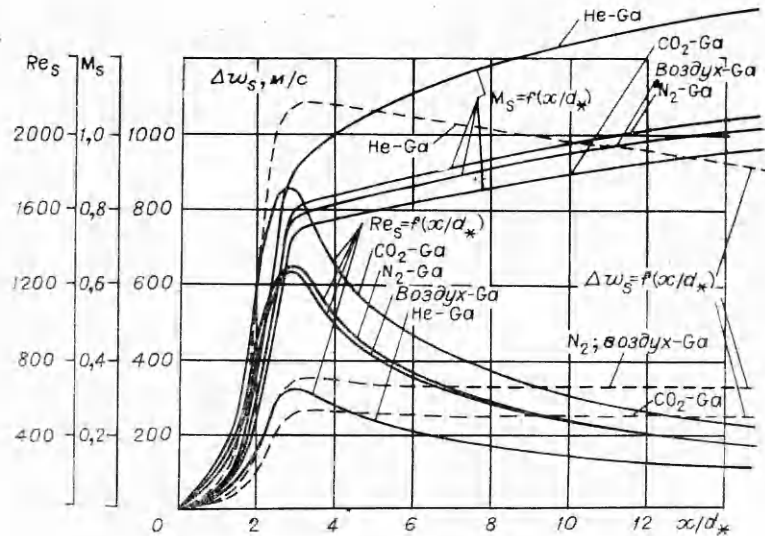
Состав эвтектического сплава, %	$T_{\text{плав}}, \text{K}$
88 Ga, 12 Sn	290
76 Ga, 24 Sn	288,7
30 Ga, 60 In, 10 Sn	285
62 Ga, 25 In, 13 Sn	278
61 Ga, 25 In, 13 Sn, 1Zn	276

котором диаметры частиц галлия находились в диапазоне  $d_s = 0,5 - 30$  мкм, концентрация частиц при этом предполагалась незначительной; в дальнейшем прослеживались параметры только частиц максимального диаметра  $(d_s)_{\text{max}} = 30$  мкм, так как эксперименты целесообразно проводить на частицах наибольшего размера.

Результаты расчетов представлены на фиг. 1, 2. Здесь показаны зависимости  $w = f(x/d_*)$  и  $w_s = f(x/d_*)$ , а также  $\Delta w_s = f(x/d_*)$  для неравновесных течений смесей частиц галлия и инертных газов (He, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) или воздуха. Можно видеть, что величины абсолютной  $w_s$  и относительной скорости  $\Delta w_s = |w - w_s|$  частиц галлия в сопле Лавала сильно зависят от теплофизических свойств транспортирующего газа и достигают сравнительно больших значений: при разгоне частиц галлия низкомолекулярным газом (He,  $\mu = 4,002$ ) они приобретают на срезе сопла наибольшие значения абсолютной и относительной скорости ( $w_s \approx 1300$  м/с,  $\Delta w_s = 870$  м/с); при обтекании их высокомолекулярным газом (CO<sub>2</sub>,  $\mu = 44$ ) — наименьшие значения абсолютной и от-



Фиг. 1



Фиг. 2

носительной скорости ( $w_s = 450$  м/с,  $\Delta w_s = 250$  м/с). Интересно, что кривые  $\Delta w_s = f(x/d_*)$  для частиц галлия, обтекаемых вышеназванными газами, начиная с величин  $x/d_* \approx 3$ , становятся параллельными друг другу и оси абсцисс.

При разгоне частиц галлия гелием эти кривые  $\Delta w_s = f(x/d_*)$  в сужающейся части сопла характеризуются высокими значениями производной  $\partial(\Delta w_s)/\partial(x/d_*)$ , в области горловины сопла она достигает максимума, а затем начинает плавно уменьшаться.

На фиг. 2 приведены также результаты расчетов, показывающие изменение числа Маха  $M_s$  (движение газа относительно частиц) вдоль оси экспериментального сопла для различных смесей газов и частиц галлия. Расчеты показали, что наибольших значений числа Маха достигают в районе выходного сечения сопла, при этом для смеси частиц галлия с азотом, воздухом и углекислым газом они равны  $\sim 1$ , а для смеси гелия и частиц галлия больше 1 ( $M_s = 1,34$ ). Величина  $M_s > 1$  означает, что скорость обтекания частиц галлия гелием в районе выходного сечения сопла стала сверхзвуковой, перед частицами возникли отошедшие микроскачки уплотнения, а позади частиц появились следы, вытянутые вдоль потока.

Из результатов расчета  $T = f(x/d_*)$  и  $T_s = f(x/d_*)$  следует, что при обдуве частиц галлия низкомолекулярным газом (He) последние интенсивно охлаждаются и в районе выходного сечения сопла, по-видимому, затвердевают, поскольку температура частиц ( $T_s = 280$  К) меньше температуры плавления галлия ( $T_{пл} = 302,8$  К). При обтекании галлиевых частиц высокомолекулярным газом ( $\text{CO}_2$ ), а также азотом и воздухом их температура по длине сопла изменяется мало и в районе выходного сечения сопла превосходит температуру плавления галлия, частицы в этих случаях остаются жидкими. Согласно расчетам, величина температурного запаздывания частиц галлия слабо зависит от теплофизических свойств транспортирующего газа и в районе среза экспериментального сопла во всех рассмотренных вариантах не превышает  $\Delta T_s = |T - T_s| = 250$  К.

В работе также исследовано изменение чисел Рейнольдса  $Re_s$  и Вебера  $W_s$  по длине сопла для рассматриваемых смесей газов и частиц галлия. Из расчетов видно, что эти кривые в сопле подобны: их максимумы находятся в области горловины сопла (при  $x/d_* \approx 3$ ), где плотность газа еще достаточно высока и относительная скорость  $|w-w_s|$  достигает предельного значения. Далее вдоль оси сопла из-за быстрого уменьшения плотности газа происходит быстрое уменьшение чисел  $Re_s$  и  $W_s$ . На фиг. 2 видно, что при разгоне частиц галлия в экспериментальном сопле углекислым газом число  $Re_s$  имеет наибольшее значение ( $Re_s = 1650$ ), при разгоне гелием — наименьшее ( $Re_s = 651$ ). По критерию Вебера картина получается обратной: наибольшее значение (число  $W_s = 22$ ) получается при обдуве частиц галлия гелием, наименьшее ( $W_s = 14$ ) — при обдуве частиц галлия углекислым газом. Получение калиброванных жидких частиц легкоплавких металлов в настоящее время возможно с помощью специальных генераторов капель. Для получения «калиброванного» двухфазного течения смеси, например, воздуха и частиц галлия с расходом транспортирующего газа  $G \leq 0,7$  кг/с и подогревом его до  $T \approx 600$  К требуется подвести к установке, как показывают расчеты, мощность  $W < 190$  кВт.

Авторы благодарят В. К. Старкова и У. Г. Пирумова за обсуждение результатов работы, Н. М. Алексею за помощь в построении графиков.

Поступила 6 I 1975

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бахир Л. П., Левашенко Г. И. Исследование размеров капель окиси алюминия вблизи горячей поверхности топлива.— ФГВ, 1973, т. 9, № 6.
2. Буглаева Л. Д., Вернидуб И. И., Корсунов Ю. А., Тимохин Э. М., Тишин А. П. Экспериментальное определение условий дробления капель окиси алюминия в высокотемпературном потоке газа.— «Инж.-физ. журн.», 1974, т. XXVI, № 5.
3. Brown B. Rocket motor performance nozzle configuration effects in two phase flow. Pyrodynamics, 1966, 3, 3—4.
4. Crowe G. T., Willoughbi P. G. A mechanism for particle growth in a rocket nozzle.— «AIAA J.», 1966, vol. 4, N 9. Рус. пер. «Ракетн. техн. и космонавтика», 1966, № 9.
5. Crowe G. T., Willoughbi P. G. A study of particle growth in a rocket nozzle.— «AIAA J.», 1967, vol. 5, N 7. Рус. пер. «Ракетн. техн. и космонавтика», 1967, № 7.
6. Dean L. E., Keith R. C., Summer T. L., Taylor M. V. Ignition and combustion of aluminium in small-scale liquid rocket engines.— «J. Spacecraft and Rockets», 1965, vol. 2, N 5.
7. Dobbins R. A. Measurement of mean particle size in a gas-particle flow.— «AIAA. J.», 1963, vol. 1, N 8. Рус. пер. «Ракетн. техн. и космонавтика», 1963, № 8.
8. Dobbins R. A. Remote size measurements of particulate products of heterogeneous combustion.— In: 11th Symp. (Internat.) Combust. Pittsburgh, 1967.
9. Dobbins R. A., Strand L. D. A comparison of two methods of measuring particle size of  $Al_2O_3$  produced by a small rocket motor.— «AIAA, J.», 1970, vol. 8, N 9. Рус. пер. «Ракетн. техн. и космонавтика», 1970, № 9.
10. Brown B., Mc Arty K. P. Particle size of condensed oxide from combustion of metalized solid propellant. Proc.— In: 8th Internat. Combust. Symp. Baltimore, 1962.
11. Cheung H. S., Cohen N. Performance of solid propellant containing metal additives.— «AIAA J.», 1965, vol. 3, N 2. Рус. пер. «Ракетн. техн. и космонавтика», 1965, № 2.
12. Kliegel I. R., Nickerson G. R. Flow of gas-particle mixtures in axially symmetric nozzles.— In: Detonation and two-phase flow. N. Y., Acad. press, 1962. Рус. пер. Течение смеси газа и твердых частиц в осесимметричном сопле.— В кн.: Дегонация и двухфазное течение. М., «Мир», 1966.
13. Гришин С. Д., Тишин А. П., Хайрутдинов Р. И. Неравновесное двухфазное течение в сопле Лавала с коагуляцией частиц полидисперсного конденсата.— «Изв. АН СССР», 1969, № 2.

14. Тишин А. П., Хайрутдинов Р. И. К расчету коагуляции частиц-конденсата в соплах Лавалля.—Изв. АН СССР. МЖГ, 1971, № 5.  
15. Шека И. А., Чаус И. С., Митюрева Т. Т. Галлий. Киев, «Наукова думка», 1963.

УДК 532.501.34; 66.061.5

## ВЛИЯНИЕ МАССООБМЕНА И ГЕТЕРОГЕННОЙ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЖИДКОЙ ПЛЕНКИ

*Л. М. Рабинович**(Москва)*

Рассмотрена устойчивость ламинарной жидкой пленки при наличии гетерогенной химической реакции. Получено дисперсионное уравнение и найдены области устойчивости для длинноволновых и коротковолновых возмущений.

1. Процессы массопереноса на поверхности фазового раздела способны существенно влиять на характеристики устойчивости этой поверхности и, в частности, повести к специфической поверхностной неустойчивости, так называемой межфазовой турбулентности [1], механизм которой тесно связан со скоростью массопереноса, что подтверждено в ряде экспериментальных работ [2—6].

Этот эффект представляет значительный практический интерес в связи с искусственной интенсификацией процессов массопереноса в ряде реакторов химической технологии (например, в пленочных реакторах). В общем случае массообмен сопровождается гомо- и гетерогенными химическими реакциями, идущими как в жидкой пленке, так и в окружающей (обычно газовой) фазе.

Исследование задач об устойчивости систем такого рода по отношению к малым возмущениям в полной постановке весьма сложно и математически громоздко. Для получения предварительных качественных результатов ниже рассмотрена несколько идеализированная схема поверхностной неустойчивости (предполагается наличие тонких гидродинамического и диффузионного пограничных слоев вблизи поверхности и гетерогенной химической реакции первого порядка). В данной работе поставлена задача: разрешая дисперсионное уравнение, найти области (по длинам волн возмущений) устойчивости ламинарной пленки с учетом эффекта Марангоши [1].

2. Рассмотрим тонкую жидкую пленку, поверхность которой отделяет ее от газовой фазы. Имеет место случай ламинарного стекания пленки ( $Re \leq 20-30$ ,  $Pr \gg 1$ ) по вертикальной пластинке в поле тяжести при встречном газовом потоке, контактирующем с ее поверхностью. Предполагается, что движение газа происходит с достаточно малыми скоростями для сохранения ламинарного режима стекания жидкости.

В такой системе массообмен лимитируется процессами переноса в жидкости, поскольку их скорость существенно меньше соответствующих скоростей в газе, что позволяет рассматривать массоперенос лишь в жидкой фазе. На поверхности пленки идет мономолекулярная химическая реакция  $A \rightarrow B$ , для которой справедлив ряд предположений: реакция